

Der wasserstrahlgeführte Laser und seine Anwendungen

Dr.-Ing. Bernold Richerzhagen
SYNOVA S.A., CH-Lausanne

I ... managed to illuminate the interior of a stream [of water] in a dark space. I have discovered that this arrangement ... offers in its results one of the most beautiful, and most curious, experiments that one can perform in a course on optics. – Daniel Colladon, 1842 /Lit 1/

Rückblick

Daniel Colladon war ein 38-Jahre alter Professor an der Universität von Genf als er 1841 zum ersten mal Licht leitete, und zwar in einem Wasserstrahl, um das Abbrechen von freien Wasserstrahlen zu demonstrieren. Der Wasserstrahl ist daher die erste optische Faser.

150 Jahre später, um genau zu sein 1993 gelang es Wissenschaftlern des Instituts für Angewandte Optik der ETH Lausanne, nur 50 km entfernt von dem Ort des „Uerfinders“, erstmals einen Laserstrahl in einem Wasserstrahl zu führen, der genügend Leistung hatte, um damit Material abzutragen.

Das Verfahren wurde ursprünglich entwickelt, um die Wärmeschädigung des Laserabtragens in der Zahnmedizin zu verringern. Tatsächlich hat die Benutzung des Wasserstrahles statt eines Gases neben dem Kühleffekt aber noch viele andere wichtige Vorteile, die dem Laser seit 1993 neue Anwendungen und Märkte in der industriellen Materialbearbeitung eröffnet haben.

Das Prinzip des wasserstrahlgeführten Lasers

Die Grundidee ist denkbar einfach: man nehme einen Wasserstrahl und kopple einen Laserstrahl ein. Nur die Ausführung ist weitaus schwieriger, sonst hätte es nicht 30 Jahre - nach der Erfindung des Lasers - gedauert bis zur erfolgreichen Umsetzung.

Die Schwierigkeit bestand darin, zwei Medien – Licht und Wasser – miteinander zu „verheiraten“, die sich nicht immer unbedingt lieben. Das Wasser „ärgert“ nämlich den Laserstrahl, indem es sich dort erwärmt, wo der Laserstrahl durchtritt und dabei durch Änderungen im Brechungsindex eine negative Linse im Wasser bildet („thermal lensing“), die dazu führt, dass sich der Laserstrahl aufweitet, und zwar in einem solchen Masse, dass die Einkopplung vollkommen uneffizient wird. Der Schlüssel zum Erfolg lag im Verständnis dieses nicht-linearen optischen Phänomens sowie in der Umgehung desselben mit konstruktiven Maßnahmen. Dies ist gelungen durch eine hoch-dynamische Strömung in der Laserstrahleinkopplung, die dank einer symmetrischen Zuführung des Wassers trotzdem zu einem stabilen Wasserstrahl führt. Mit diesem Kniff gelang es, hohe Laserleistungen in einen haarfeinen Wasserstrahl einzukoppeln, der zum Abtrag von Material herangezogen werden kann.

Heutiger Stand der Technik des wasserstrahlgeführten Lasers

Von der Kaffeemaschinen-betriebenen Laborversion bis zu den heutigen, 1-Million-Franken teuren, vollautomatischen Bearbeitungsstationen hat das Verfahren viele Verbesserungsschritte durchlaufen; die Grundidee ist aber nach wie vor erhalten geblieben.

Die Laserquelle ist typischerweise ein gepulster Festkörperlaser, in der Grundwellenlänge von 1064 nm, oder frequenzverdoppelte (532 nm) bzw. – verdreifachte Nd:YAG Laser (355 nm). Es werden gepulste Laser benutzt, weil der Wasserstrahl die Zeit zwischen den Pulsen benötigt, um das Werkstück zu kühlen. Mittlere Leistungen liegen zwischen 50 und 200 W, Pulslängen im Nano- oder Mikrosekundenbereich, Pulswiederholraten zwischen 500 Hz und 50 kHz, je nach Pulslänge. Alle Laser werden nur fasergekoppelt verwendet, wobei der Faserdurchmesser zwischen 100 und 200 µm beträgt. Die Optik, die das Faserende in eine Wasserstrahldüse abbildet, hat ein Abbildungsverhältnis von zwischen 4:1 und 8:1, so dass der resultierende Bilddurchmesser in der Düse zwischen 12,5 µm und 50 µm beträgt. Es können lampengepumpte, diodengepumpte oder Faserlaser eingesetzt werden.

Das Wasser wird von einer für diese Zwecke speziell entwickelte Druckverstärkerpumpe gefördert, die einen absolut konstanten Wasserfluss in einem Druckbereich zwischen 20 und 500 bar erlaubt. Das Wasser ist entmineralisiert (per Umkehrosmose oder Harzpatronen), gefiltert (1 µm) sowie entgast (über eine Vakuummembran). Durchflussmengen sind zwischen 5 und 75 ml/min, so dass eine Rückgewinnung und Aufbereitung des Schneidwassers unnötig ist.

Die heutigen optimierten Wasserstrahldüsen bestehen aus Saphir oder Diamant und haben Durchmesser zwischen 30 µm und 150 µm, wobei dem Durchmesser nach oben keine Grenzen gesetzt sind. Zur Zeit besteht ein Forschungsprojekt, um den Wasserstrahldurchmesser, der identisch mit dem Laserstrahldurchmesser ist, auf 10 µm zu reduzieren. In diesem Bereich stößt man an die physikalischen Grenzen der Stabilität des freien Wasserstrahls. Die Standzeiten der Düsen können mehrere Monate betragen, wenn die video-unterstützte Justage sorgfältig durchgeführt und regelmäßig kontrolliert wird.

Die für die Laserstrahlleitung nutzbare Länge des Wasserstrahles beträgt in grober Annäherung das 1000-fache des Düsendurchmessers. Das heißt: ein 50 µm Wasserstrahl kann den Laserstrahl unter den günstigsten Bedingungen und bei optimalen Druck über 50 mm leiten. Das bedeutet nun aber nicht, dass man damit 50 mm dickes Material schneiden könnte... Ein 10 µm Wasserstrahl hätte demnach eine Arbeitslänge von immerhin noch 10 mm.

Der Laserstrahl füllt den Wasserstrahl vollkommen aus und wird über die Totalreflexion am Übergang Wasser-Luft geleitet, die einzigen Verluste ergeben sich durch die Absorption in der Flüssigkeit, welche von der Wellenlänge abhängt, und bei hohen Spitzenleistungen bei Ramanstreuung. Der Wasserstrahldurchmesser beträgt ca. 83% des Düsendurchmessers, da der Düseneintritt scharfkantig ist und folglich eine Strahleinschnürung stattfindet.

Die resultierende Schnittspaltbreite ist größer als der Wasserstrahl, im Schnitt 10%. Beispiel: eine 30-µm Wasserstrahldüse erzeugt einen 25-µm Wasser-Laserstrahl, der einen Schnittspalt von 27 µm macht. Der Wasserstrahl ist also in der Lage, die Laserenergie durch den Materialspalt zu leiten bis auf den Grund des Schnittspaltes - eine überaus wertvolle Fähigkeit.

Der Wasserstrahl ist außerdem in der Lage, in jeder Lage zu schneiden, senkrecht, waagrecht oder von unten. Sehr hilfreich ist die Tatsache, dass der Wasserstrahl-Laser durch einen dünnen Wasserfilm schneiden kann, so dass empfindliche Werkstücke absolut ablagerungsfrei bearbeitet werden können.

Generell lässt sich der Laser-Wasserstrahl zu jeder Art Materialabtragung einsetzen. Grenzen werden zum einen durch das Material gesetzt, wenn es das Laserlicht nicht absorbiert, wie z.B. Glas, Holz, Textilien, oder durch die Dicke, wenn es das Laserlicht stark reflektiert wie z.B. Kupfer; zum anderen durch die Anwendung, wenn tiefe kleine Löcher gebohrt müssen, aus denen das Wasser nicht austreten kann (Aspektverhältnis beim Bohren 1:3). Ansonsten hat dieses Verfahren praktisch keine Grenzen. Ganz selten stellt die Verwendung von Wasser ein Problem dar.

Die Vorteile des wasserstrahlgeführten Lasers

Zahlreiche Vorteile ergeben sich mit der Wasserstrahlführung, die hier im Vergleich zum klassischen Laserschneiden kurz diskutiert werden.

Der Wasserstrahl führt die in das Material eingebrachte Wärme sofort wieder ab, und zwar zwischen den Laserpulsen. Damit bleibt das Werkstück kalt, eine Veränderung des Materials durch Wärme findet nicht statt, das heißt es gibt keine Gefügeveränderungen, Oxydation oder Mikrorisse. Hinzukommt, dass das Material sich thermisch nicht verformt, die Toleranzen der gefertigten Produkte sind dementsprechend sehr klein.

Der Laserstrahldurchmesser wird durch den Wasserstrahldurchmesser vorgegeben, der wiederum vollkommen konstant ist. Damit wird eine Bearbeitungsgenauigkeit von bis zu 1 Mikrometer erreicht.

Dadurch, dass der Laserstrahl im Wasserstrahl geführt wird, gibt es keinen Brennpunkt, der Abstand ist in den Grenzen der Wasserstrahlstabilität unwichtig. Eine Abstandkontrolle entfällt. Die Bearbeitungsqualität hängt nicht vom Abstand ab.

Da der Wasserstrahl in der Lage ist, den Laserstrahl im Schnittpalt zu leiten, können sehr hohe Aspektverhältnisse beim Schneiden erreicht werden. Die Schnittkanten sind parallel.

Der neben der Abwesenheit jeglicher Wärmeeinfuhr größte Vorteil liegt in der Sauberkeit des Schnittes. Es ist zum ersten Mal möglich, vollkommen ablagerungsfrei zu schneiden, und zwar in mikroskopischer Größenordnung. Selbst Werkstoffe, die extrem zur Verschmutzung und Kontamination neigen, lassen sich absolut sauber bearbeiten.

Die Schneidprodukte werden im Wasser gebunden, so dass gesundheitsschädliche Produkte nicht in die Luft gelangen, sondern einfach aus dem Wasser gefiltert werden können.

Der Wasserstrahl hilft beim Austreiben der Schmelze. Er hat eine viel höhere kinetische Energie als der Schneidgasstrahl. Die Abtragseffizienz ist damit bei dünnen Materialien deutlich höher als beim „trockenen“ Laser. So lassen sich gütegeschaltete Laser problemlos einsetzen um dünne Materialien zu schneiden. Mit einem wasserstrahlgeführten 1 kW Laser wurden Schnittgeschwindigkeiten von mehr als 4 m/s in Nickelfolien erreicht.

Der Wasserstrahl stellt eine konstante und kleine Kraft dar, wesentlich geringer als der Schneidgasstrahl. Das führt dazu, dass mikrometer-feine Strukturen ohne Vibrationen geschnitten werden können.

Der Strahldurchmesser ist bei vergleichbarer Laserleistung beim wasserstrahlgeführten Laser kleiner als beim konventionellen Laser. 27-um Schnitte mit 100 Watt sind problemlos zu erreichen, 40-um mit 200 W.

Der Wasserstrahl macht es möglich, den infraroten Laser dort einzusetzen, wo man selbst mit konventionellen UV-Lasern nur eine deutlich schlechtere Qualität erreicht. Damit sind bei besserer Schnittqualität höhere Leistungen möglich, geringere Anschaffungskosten sowie geringere Verbrauchskosten.

Der effiziente Austrieb und die sofortige Kühlung machen es möglich, Vertiefungen zu schaffen, welche sehr glatt sind. Es können Gräben erzeugt werden, deren Tiefe im Bereich von 3 um konstant ist. Kantenrauigkeiten von Tal-zu-Berg Werten von 1 um sind realisierbar.

Der Wasserstrahl erlaubt den Einsatz von Trägerfolien, auf denen das Schnittgut fixiert bleibt nach dem Schneiden. Die Trägerfolien sind so gestaltet, dass der Laserstrahl die Folie nicht zerschneidet und der Wasserstrahl samt Materialabtrag dank der Porosität der Folie hindurch kann.

Es gibt kaum einen Bereich, in dem der Wasserstrahlaser nicht eine Verbesserung gegenüber dem konventionellen Laser bietet. Damit ist der Wasserstrahlaser das Werkzeug der Zukunft in der Präzisionsmaterialbearbeitung.

Anwendungen

Praktisch alle Präzisionsschneidanwendungen bis auf das Tieflochbohren lassen sich mit dem wasserstrahlgeführten Laser durchführen. Es gibt daneben neue Anwendungsfelder, die nur mit der Kombination Wasserstrahl und Laser möglich sind.

Hier einige prägnante Beispiele, die den Fortschritt zeigen, den man unter Einsatz des Wasserstrahlasers erreichen kann:

1. Schneiden von medizinischen Stents
Stents werden in der Medizin eingesetzt, um verstopfte Arterien frei zu halten. Sie stützen und weiten das Gewebe und erlauben einen normalen Blutfluss. Sie bestehen in der Regel aus Edelstahl oder Nickel-Titan. Die Konturen, die in diesen expandierbaren Röhrchen zu schneiden sind, sind sehr klein. Zur Zeit kommt der Laser oder das chemische Ätzen zum Einsatz. Das Lasern der Stents erfordert eine aufwendige Nachbearbeitung durch mechanische und chemische Reinigungs- und Politurprozesse. Der wasserstrahlgeführte Laser verhindert jegliche Materialveränderung - eine sehr wichtige Eigenschaft für Teile, die unter keinen Umständen versagen dürfen; die Stents sind nach dem Schneiden bereits so sauber, dass die Nachbearbeitungen deutlich verkürzt werden können. Der kleine Strahlradius von nur 14 um erlaubt, kleinste Radien zu fahren. Schnittgeschwindigkeiten von mehr als 12 mm/s ermöglichen einen hohen Durchsatz. Die für den Einsatz des Wasserstrahlasers entscheidenden Vorteile sind kein Wärmeeinfluss, kleiner Strahlradius, hohe Geschwindigkeit, geringste Kräfte auf das Material, sowie keine Ablagerungen.
2. Bohren von Metallschablonen
Metallschablonen (sogenannte Stencils) kommen unter anderem zum Einsatz

in der Herstellung von Leiterplatten, wenn die Lötpaste aufgebracht wird, oder bei der Herstellung von Flachbildschirmen (Plasma, LCD). Standardverfahren für das Bohren von Metallschablonen sind das Lasern und bei dünnen Präzisionsschablonen das Ätzen. Der Trend zu immer kleineren Öffnungen, einer größeren Anzahl von Öffnungen, dünneren Schablonen wie auch höheren Toleranzanforderungen machen das Wasserstrahl Lasern attraktiv. Geringste Stegbreiten verformen sich nicht, die Schablone verzieht sich nicht durch Wärmeeinbringung, der kleine Strahlradius von 14 µm erlaubt scharfe Innenecken, es gibt überhaupt keine Oxydation, keine Ablagerung und praktisch keine Grate, die entfernt werden müssten. Der Winkel der Kanten ist programmierbar, damit sich die Paste einfach lösen kann. Die in die Maschine integrierte Bildverarbeitung kann zum Vermessen der Resultate verwendet werden, wie auch - was absolut einzigartig ist - zur Reparatur, wenn Öffnungen nicht oder teilweise geschnitten worden sind. Die Bohrgeschwindigkeit beträgt bis zu 20 Löcher pro Sekunde in 50 µm dünnen Edelstahlblechen. Die ausschlaggebenden Vorteile sind der nicht vorhandene Wärmeeinfluss, der kleine Strahlradius, die Grat- und Ablagerungsfreiheit, die große Arbeitslänge, die hohe Abtragseffizienz, und die geringen Fertigungstoleranzen.

3. Schneiden von Ferritkernen
Ferritkerne werden gebraucht, um Spannungen zu transformieren. Unter anderem kommen sie in Mobilfunkgeräten zum Einsatz. Gewisse Ausführungen der Ferritkerne benötigen einen Luftspalt. Das Standardverfahren ist das Diamantsägen, bzw. Brechen und nachfolgendem Kleben. Der Wasserstrahl Laser ist in der Lage, diesen Prozess zu automatisieren mit einer sehr kleinen Fertigungstoleranz wie auch geringen Verschleißkosten. Der Wasserstrahl Laser erzeugt absolut parallele Schneidkanten, frei von jeglichen Ablagerungen, ohne Ausbrüche, mit geringsten Toleranzen. Der Schnitttiefe sind praktisch keine Grenzen gesetzt (mehr als 20 mm sind möglich). Die folgenden Vorteile führen zu der Überlegenheit des Wasserstrahl Lasers: hohe Arbeitslänge, Leitung des Laserstrahls im Schnittspalt, keine Wärmeeinfuhr, keine Ablagerungen, sehr hohe Fertigungsgenauigkeit.
4. Schneiden von harten Werkstoffen (CBN, PKD, Hartmetall)
Harte Werkstoffe wie Bornitrid, Diamant oder Siliziumnitrid werden vor allem für Werkzeuge in der Bearbeitung von harten Werkstoffen eingesetzt; eine mögliche Verwendung von Hartmetall ist die Herstellung von Formen in der Keramikverarbeitung für die Katalysatorherstellung. Die Materialdicken liegen typischerweise im Bereich einiger Millimeter. Die Schwierigkeit der klassischen Bearbeitung liegt in der Härte dieser Materialien, daher kommen Funkenerosion und Laser zum Einsatz, letztere erfordern aber eine aufwendige Nachbearbeitung der Kanten. Der Wasserstrahl Laser bietet hier erhebliche Vorteile, die Kanten sind absolut rechtwinklig, frei von Ablagerungen und Wärmeeinfluss. Die Oberflächenqualität ist hervorragend, ähnlich der Funkenerosion. Es können 50 µm breite und 2 mm tiefe Gräben in Hartmetall erzeugt werden, die kein anderes Verfahren auf der Welt schaffen würde. Somit sind neue Katalysatoren mit höherer Effizienz für die Automobilindustrie möglich.
5. Schneiden von dünnen Verpackungsfolien
Eine Spezialanwendung mit einem großen Einsatzpotenzial stellt das Hochgeschwindigkeitsschneiden von dünnen Metallfolien dar, die zum

Beispiel in der Nahrungsmittelindustrie zur Verpackung eingesetzt werden. Zur Zeit werden sie im Stapel gestanzt oder einzeln mit dem Messer geschnitten. Der Trend zu immer vielfältigeren Verpackungen mit geringeren Zyklen erfordert die Erwägung alternativer Schneidverfahren. Dank dem sehr effizienten Schmelzaustrieb durch den Wasserstrahl lassen sich hohe Laserleistungen in höhere Schnittgeschwindigkeiten umsetzen. Der konventionelle Laser hat das Problem, dass er zwar mit hohen Laserleistungen das Material schnell aufschmelzen, aber nicht austreiben kann, denn dafür ist der Schneidgasstrahl viel zu schwach. Die Folge ist, dass die Kanten wieder zuschmelzen, was der Wasserstrahl laser gerade verhindert. Aluminium-, Edelstahl- oder Nickelfolien können in einer Materialstärke von 10 um bis 80 um mit guter Qualität und Geschwindigkeiten von über 4 m/s geschnitten werden können. Der verwendete Laser ist ein dioden-gepumpter Dauerstrich-Scheibenlaser von 1 kW Strahlleistung.

6. Vereinzeln von Halbleiterwafern
Integrierte Schaltkreise, auch Mikrochips genannt, werden auf der Basis von Halbleitermaterialien wie Silizium, Galliumarsenid, Indiumphosphid, Galliumnitrid, etc, hergestellt. Wenn alle Strukturen auf dem Halbleiterwafer aufgebracht sind, muss der Wafer „zerschnitten“ werden, um die einzelnen Chips zu erhalten. Das etablierte Verfahren ist das Sägen mit Diamantscheiben. Heutzutage werden die Anforderungen an das Trennverfahren immer größer, da zerbrechliche Schichten sowie extrem dünne Wafer der Säge das Leben schwer machen. Konventionelle Laser kamen in der Vergangenheit durch zu große Qualitätsprobleme hier nicht zum Einsatz. Daran wird auch der UV-Laser nichts grundlegend ändern, da die Probleme der Kontamination, Kantenrauigkeit und geringe Effizienz nach wie vor vorhanden sind. Der Wasserstrahl laser hingegen erzeugt für den „normalen“ Laser ganz undenkbare Resultate: die Kontamination wird um mehrere Zehnerpotenzen auf praktisch Null reduziert. Schnittqualität und Schnittgeschwindigkeit sind dem klassischen Laser meilenweit voraus. Sollten in den kommenden Jahren selbst 100 W starke UV Laser auf den Markt kommen, werden sie dennoch nie die Qualität erreichen, die der Laserwasserstrahl mit infraroten oder grünen Laserquellen bereits heute problemlos erreicht.

Literatur

/Lit 1/ Daniel Colladon, „On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream,“ Comptes Rendus 15, pp. 800-802 (1842)